

3. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. – М.: Наука, 1977.
4. Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. – М.: Наука, 1988.
5. Островский Ю.И., Морозов Н.В. Голографическая интерферометрия движущихся объектов//Голографическая и оптическая обработка информации. – Л.: ФТИ, 1980, с.124.
6. Хокли В., Форд Р., Фурд С. Измерение вибраций вентиляторов при помощи двухимпульсной голографии//Энергетические машины и установки, 1980, т. 100, №4. с. 192.
7. Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н. Исследование особенностей колебаний вращающихся тел с конструктивно-поворотной симметрией//Известия Самарского научного Центра РАН, 1999, №2, с. 329-334.

### **ПРОГРАММНО-АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЛАСТИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Громаковский Д.Г., Ибатуллин И.Д., Дынников А.В., Лаврентьева С.В.  
Самарский государственный технический университет, г. Самара

В настоящее время Российская промышленность располагает огромным парком технологических, энергетических и транспортных машин и установок, работающих в условиях высоких вибрационных нагрузок, трибоз воздействий, сильных ионизирующих излучений и т.п., что приводит к преждевременному физическому старению, химической и структурной деградации и потере пластичности материалов. Растет также количество оборудования, выработавшего свой назначенный ресурс, эксплуатация которого без обоснования надежных критериев безопасности недопустима. Задача отслеживать выработанный и остаточный ресурс машин по их фактическому состоянию становится все более значимой и требует разработки и совершенствования неразрушающих, экспрессных методов исследования кинетики повреждаемости материалов. Кроме того, принятые в промышленности показатели состояния материалов твердость, ударная вязкость и др., как показала практика, плохо сочетаются с существующими методиками прогнозирования фактической прочности материалов и их остаточного ресурса.

Техническое решение этой проблемы намечается путем разработки программно-аппаратурного комплекса для оценки остаточного ресурса конструкций и оборудования при использовании разрабатываемого в СамГТУ нового способа оценки изменения пластичности конструкцион-

ных материалов методом склерометрирования. В новом способе использована теоретическая база термофлуктуационной теории прочности материалов [1, 2]. При оценке пластичности материалов на поверхности испытуемой детали алмазным индентором оттесняют микроборозды, оценивают количество оттесненного материала, затраченную на это работу и рассчитывают энергию активации пластической деформации -  $U_0$  в размерности кДж/моль.

Склерометрический способ оценки энергии активации пластической деформации характеризуется высокой чувствительностью, позволяет учитывать физико-химическую и структурную модификацию материалов под влиянием комбинированного действия среды, статических и динамических нагрузок, радиации, температуры и др. факторов. Получаемая величина энергии активации пластической деформации является энергетическим показателем пластичности, знание которого позволяет прогнозировать остаточный ресурс элементов конструкций и механизмов, выявлять оптимальные условия деформирования и трения, оценивать совместимость конструкционных и смазочных материалов, оптимизировать методы химико-термической обработки деталей и др.

Применение склерометрического программно-аппаратурного комплекса позволит снизить трудоемкость, сократить длительность, энергоемкость и материалоемкость испытаний. Кроме того, важной особенностью склерометрических методов испытаний является неразрушающий и экспрессный характер исследований, что позволит использовать комплекс для контроля качества готовых изделий.

Теоретическое обоснование предлагаемого склерометрического способа оценки энергии активации пластической деформации металлов и сплавов строится на основе кинетической модели долговечности межатомных связей в поле действующих нагрузок и температур С.Н. Журкова

$$U_0 = 2,3kT \lg \left( \frac{\tau_p}{\tau_0} \right) + \gamma\sigma, \text{ кДж/моль}, \quad (1)$$

где  $U_0$  – энергия активации действующего механизма разрушения материала;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент;  $\sigma$  – действующая нагрузка;  $\tau_p$  – время до разрушения связи;  $\tau_0$  – постоянная времени.

Традиционно оценку энергии активации материалов производят при испытаниях на ползучесть при различных нагрузках и температурах. Строят зависимость  $U_0$  от  $\sigma$  и экстраполируют ее до значения  $\sigma \rightarrow 0$ . Этот способ оправдан для изучения разрушения материалов в процессе высокотемпературной ползучести, но на практике более важное значение имеет прогнозирование усталостного разрушения материалов, происходящего по

дислокационному механизму, поскольку такие разрушения протекают наиболее быстро и непредсказуемо.

Поэтому в новом способе оценки энергии активации пластической деформации на испытуемый материал воздействуют высокими нагрузками, приближающимися по величине к значению твердости  $\sigma \rightarrow HB$ . При этом учитывается, что величина термического члена представленного в выражении (1) приближается к нулю, поскольку при высоких нагрузках время до разрушения  $\tau_p \rightarrow \tau_0$ , а пластическая деформация материала имеет атермический характер.

Для реализации указанного выше способа разработана методика неразрушающей, экспрессной, склерометрической оценки энергии активации пластической деформации металлов и сплавов –  $U_0$ . Этот параметр характеризует в системе эффективный потенциальный барьер начала реализации пластической деформации, преодоления сил, препятствующих образованию и движению дислокаций, таких как силы межатомных связей, противодействие дислокационных зарядов, барьерного эффекта различных дефектов и граничных пленок, влияющих на скольжение дислокаций и др. Энергия активации при склерометрировании в первом приближении находится как удельная энергия, расходуемая на пластическое оттеснение материала поверхностного слоя количеством в 1 моль, из выражения (2)

$$U_0 = \frac{14,286 \cdot V_m \cdot (P-1) \cdot N \cdot f}{D_s^2 - D_l^2} \text{ [кДж/моль]}, \quad \gamma = U_0 / H_\mu, \quad (2)$$

где  $V_m$  - молярный объем, [мм<sup>3</sup>/моль];  $P$  - число проходов индентора;  $f$  – сопротивление пластической деформации;  $N$  - нагрузка на индентор, [Н];  $H_\mu$  - микротвердость [кгс/мм<sup>2</sup>].

При оценке остаточного ресурса деталей из металлов и сплавов на основе термофлуктуационной теории прочности твердых тел использованы идеи В.В. Федорова [3] о критической повреждаемости материалов, синергетическая концепция о фазовых переходах системы в точках бифуркации [4], гипотеза линейного суммирования повреждений, а также накопленный авторами экспериментальный материал по кинетике разрушения металлов и сплавов при различных видах разрушающего воздействия.

Известно, что появление дефектов сопровождается приращением внутренней энергии кристаллической решетки. При достижении внутренней энергии критического значения наблюдается бифуркация, как начало разрушения материала.

Экспериментально-расчетная методика оценки остаточного ресурса материалов [5, 6 и др.] предусматривает также создание базы данных о



величине энергии активации  $U_0^{кр}$  материалов, свидетельствующей о возникновении критического состояния при котором действие эксплуатационных разрушающих факторов: радиации, высоких температур, коррозионно-активных сред и приложенных нагрузок связано с повышенным риском его усталостного разрушения. Оценку  $U_0^{кр}$  можно проводить на модельных образцах, подверженных воздействиями эксплуатационных факторов от начального состояния до появления на них признаков разрушения – усталостных трещин. Экспериментальная оценка критического значения энергии активации материалов производится на образцах в зоне, прилегающей к краям трещины. Сравнение величины  $U_0^{кр}$  с начальным значением  $U_0^{нач}$  с учетом скорости повреждаемости позволяет оценивать запас ресурсных характеристик. При этом база данных должна включать значения энергии активации пластической деформации материалов в состоянии после поставки и обработки деталей. Для оценки остаточного ресурса  $\delta$  (в %) в первом приближении можно использовать соотношение

$$\delta = 100 \left( 1 - \frac{U_0 - U_0^{ущ}}{U_0^{кр} - U_0^{ущ}} \right) \%, \quad (3)$$

где  $U_0$  – текущее значение энергии активации пластической деформации;  $U_0^{нач}$ ,  $U_0^{кр}$  – начальное и критическое значения энергии активации материала детали.

На основании испытаний и базы данных об энергии активации эксплуатируемых материалов производят оценку их остаточного ресурса. При этом определяют текущее значение энергии активации пластической деформации исследуемого элемента в наиболее уязвимом месте, а затем рассчитывают остаточный ресурс по формуле (3). Приближенную оценку остаточного ресурса по времени –  $t_{ост}$ , можно определить из выражения

$$t_{ост} = \left( 100 / [100 - \delta] \right) \cdot t_{экр} - t_{экр} = t_{рес} - t_{экр}, \quad (4)$$

где  $t_{экр}$  – длительность эксплуатации исследуемого элемента,

$t_{рес}$  – ожидаемый общий ресурс испытываемого элемента, включающий время его эксплуатации.

Величина  $[100 - \delta]$  характеризует степень деградации материала относительно исходного состояния, т.е. выработанный ресурс (в %). Иллюстрация методики оценки остаточного ресурса приведена на рис. 2.

Для деталей, работающих в режиме циклического нагружения, возможна аналогичная оценка ресурса в циклах наработки –  $N_{ц}$ :

$$N_{ц} = (100 / [100 - \delta]) \cdot N_{ц}^{нараб} \text{ (циклов)}, \quad (5)$$

где  $N_{ц}^{нараб}$  – число циклов наработки на начальной стадии испытаний.

Удобство приведенной методики состоит в том, что она инвариантна к предыстории эксплуатации элемента и виду разрушающего воздействия, поэтому в случае отсутствия данных об энергии активации материалов в

состоянии поставки или точного времени его эксплуатации можно произвести оценку остаточного ресурса в два этапа.

Вначале выполняется оценка текущего значения энергии активации исследуемого материала и фиксируется дата эксперимента. Эти данные принимаются за начальные. Через заданный интервал времени повторяют оценку текущего значения энергии активации пластической деформации материала в этом же месте. Затем производят расчет остаточного ресурса материала, принимая за  $t_{\text{ксп}}$  – время между двумя оценками энергии активации исследуемого элемента.

На способ оценки энергии активации пластической деформации методом склерометрии в СамГТУ, авторами получен патент РФ 97101152/20 (001157).

Согласно этому патенту при заданной температуре на поверхностях испытываемых образцов (требуется подготовка шлифа) алмазным индентором оттесняют микроборозды (рис. 1), оценивают затраченную на эту работу и вытесненный по краям борозды объем материала, по значениям которых рассчитывают энергию активации как удельную энергию, расходуемую на пластическое оттеснение материала поверхностного слоя количеством в 1 моль. Разработанный способ может быть использован для следующих целей:

- оценки пластичности металлов и сплавов;
- контроля качества, выбора типа или режимов химико-термической, механической обработки деталей;
- выбора, контроля и оптимизации методов механического упрочнения материалов;
- контроля качества материала покрытий;
- оптимизации условий деформирования и трения;
- оценки совместимости конструкционных и смазочных материалов;
- оценки остаточного ресурса.



Рис. 1. Вид борозды, получаемой при склерометрировании

Для реализации способа при изучении кинетики изменения энергии активации пластической деформации материалов в НТЦ "Надежность" СамГТУ разработан макет программно-аппаратурного комплекса, включающий блок обработки информации и испытательную установку, состоящую из трех узлов (см. рис. 2).

Первый узел предназначен для подготовки шлифа путем удаления дефектного слоя. Второй узел выполняет склерометрирование подготовленной поверхности и передает данные о величине работы, затраченной на пластическое оттеснение материала. Третий узел предназначен для измерения геометрических характеристик полученных борозд и для получения изображения борозды на экран монитора.

Все данные по оценке энергии активации передаются по сети в блок обработки информации, собранном на базе компьютера, который обрабатывает экспериментальные результаты и формирует базу данных об энергии активации пластической деформации материалов.

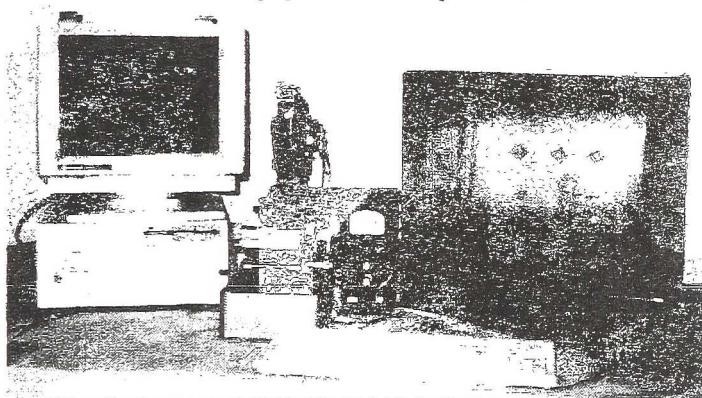


Рис.2. Макет программно-аппаратурного комплекса

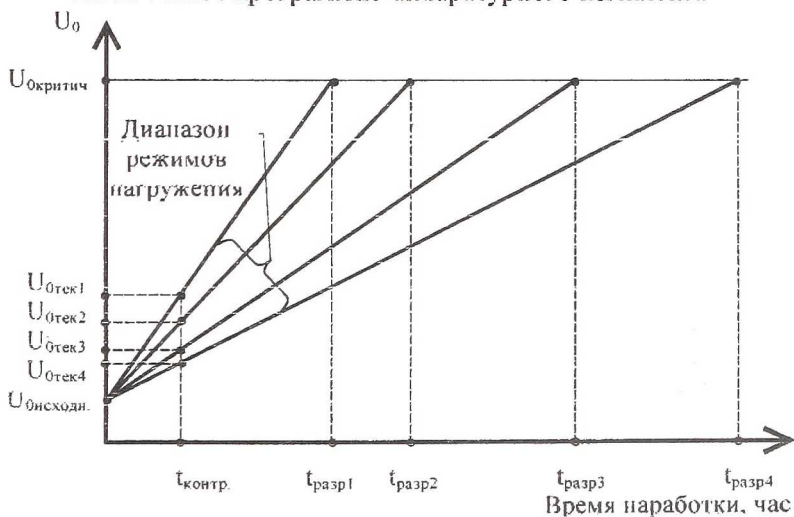


Рис. 3. К методике оценки долговечности по исходному  $U_{0исходн.}$  критическому  $U_{0критич.}$  и текущему  $U_{0тек}$  значениям энергии активации



Разработанный способ и методика проверены и подтверждены при усталостных испытаниях образцов из ряда марок сталей, алюминиевого сплава АМГ-3, бронзы БрАЖН 10-4-4 и других материалов, подвергнутых вибронагрузению и воздействию трением.

Работа над склерометрической методикой оценки энергии активации показала, что здесь требуется разработка более полных моделей изучаемых процессов, проведение расчетов и оптимизации параметров, испытания, доводка, стандартизация и сертификация разрабатываемых устройств, совершенствование методов оценки пластометрических и ресурсных характеристик материалов на основе кинетических моделей деформирования и разрушения металлов и сплавов.

Программно - аппаратный комплекс для лабораторной оценки энергии активации пластической деформации металлов имеет автоматическую систему термостабилизации образцов, автоматизированный склерометр для экспрессной оценки характеристик пластичности на поверхностях, в том числе в производственных условиях. Резерв источника автономного питания переносного модуля должен обеспечивать его непрерывную работу в течение не менее 8 часов без подзарядки. Конструкция модуля должна обеспечивать его работоспособность в условиях действующих эксплуатационных факторов.

Экспериментальные работы – создание базы данных по энергии активации в различных условиях деформации и разрушения проводятся в исследовательских лабораториях СамГТУ и ВНИИАЭС. Опытный образец программно-аппаратного комплекса в 2003-2004гг. будет испытан в лаборатории материаловедения и ресурса ВНИИ АЭС.

#### Список литературы

1. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности.// Физика твердого тела. 1980, Т 22, вып. 11.-с.3344-3349.
2. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел.-М: Наука, 1974.-5650 с.
3. Федоров В.В. Термические аспекты прочности и разрушения твердых тел.-Ташкент. Изд. ФАН Уз.ССР, 1979.-168с.
4. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. –М.: Наука, 1994.-382с.
5. Громаковский Д.Г., Ибатуллин И.Д., Дынников А.В. Разработка диагностической системы для оценки ресурсных характеристик элементов ЯЭУ // В сб. научных трудов по итогам научно-технической конф. "Научно-инновационное сотрудничество", М.: МИФИ, Ч.1, 2002.-с.84-86.

6. Громаковский Д.Г., Ибатуллин И.Д., Ковшов А.Г., Дынников А.В., Шигин С.В., Маруженков К.И. Программно-аппаратурный комплекс для оценки пластичности конструкционных материалов методом склерометрии // В каталоге выставки научно-технических работ научной сессии МИФИ, - М.: МИФИ, 2002.-с.53.

## **ДИНАМИКА ПОДВИЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИЗМЕНЕНИЕМ ПРИРОДЫ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ МАССЫ**

Иванов А.Г.

Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова,  
г. Чебоксары

Теоретические изыскания в области подвижных систем проводятся в основном для определенного вещества, составляющего либо несущую, функциональную часть, либо часть, диссипативно и упруго рассеивающую энергию движения. Однако переход вещества из одного агрегатного состояния в другое, изменения фазового равновесия, концентраций составляющих компонент, в целом, влияют на макросостояние подвижных элементов, то есть на их кинематику и динамику в условиях действия законов механики. Управление этими процессами в двигателестроении позволит повысить устойчивость подвижных систем, снизить вибрации, передающиеся на корпус. Требуется только конструктивно установить взаимосвязь развивающихся движений.

В качестве подвижной системы, предполагающей создание «природокорректирующего» механизма управления, нами разработана конструкция маятникового подвеса быстровращающегося неуравновешенного ротора с автобалансирующим устройством. Во время разгона природа корректирующей массы внутри балансирующего кольца играет важную роль для выхода вращающейся части в режим стационарного вращения при наличии неопределенного сильного дисбаланса.

Проблема становится актуальной, когда динамические нагрузки, вызванные действием центробежной силы инерции, не позволяют эксплуатировать устройства, реализующие вращение неуравновешенного ротора. Спектр таких устройств широк. Это и металлообрабатывающие станки, турбины, двигатели, бытовые автоматические стиральные машины, промышленные центрифуги, роботы, и вспомогательное технологическое оборудование.

Динамика подвижных конструкций с автобалансирующим устройством зависит от вида корректирующей массы внутри устройства. Действу-